

光合成微生物の地球環境とその保全への応用

三室 守

光合成生物はその第一次生産性を通して、地球上のほぼすべての生物の維持に必要な有機物と、同時に、酸素呼吸に必要な酸素をも供給する。これらの寄与により、光合成生物は「地球の生命維持装置」ということができる¹⁾。この第一次生産性は、クロロフィルの現存量と光合成生物の反応効率によって決まり、陸上植物が全生産量の2/3を占め、海洋の生物が残り1/3を占めると見積もられている。一方、無酸素型光合成細菌（いわゆる光合成細菌）については第一次生産性の確かな見積もりも未だに確立していない。海洋での生産性は、高緯度地域での珪藻などを中心とした高い生産性と同時に、亜熱帯域でのシアノバクテリア（ピコプランクトン）の生産性が知られ、また、近年では好気性光合成細菌の寄与も考えられている。前者は水温による制限により、後者は栄養塩による制限により、生産性が限定されると考えられている。しかし、こうした水温や海流による制限を克服もしくは改善することはできてはいない。

光合成生物の中で、光合成微生物は、原核の無酸素型光合成細菌、原核で酸素発生型光合成を営むシアノバクテリア、さらには酸素発生型光合成生物の中で“藻類”を指す²⁾。藻類であっても大型の生物（ジャイアントケルプなどの大型褐藻など）は含まない。その成育を人為的に制御が可能な微生物、ならびに未知の種を含む微生物集団を対象として議論することが多い。

光合成微生物を地球環境とその保全に利用する際、利用法は2種に大別できる。ひとつはエネルギー生産であり、還元力の供給または循環の担い手である³⁾。二番目は環境維持機能であり、光合成微生物の持つ反応特性（生理的反応系）に依存する。前者においては、光エネルギーを使って還元反応を行い、その産物を蓄積し、酸化によるエネルギー獲得を行うか、または地球上において嫌気的条件下で発生する還元物質（メタン、硫化水素など）の循環を生態系の中で担い、還元条件から酸化条件へ移行する間にエネルギーを獲得する過程である。後者の環境浄化、保全、維持に関してもさまざまな利用法が考えられ、また実際に使用されている。この場合、主に光合成細菌が使われ、藻類が使われている事例は限定的である。光合成細菌の持つ多様な代謝経路を利用している事例が多い。

光合成生物の光エネルギー変換効率は一般的には高いと考えられている。それは初期過程（光化学反応）については正しいが、細胞の生産性などを論じる際には必ず

しも高くはなく、対象とする系によってこの効率を正しく理解することが重要である。こうした点も考慮しながら、光合成微生物の地球環境とその保全への応用について、広い視野から考察する。

エネルギー生産

光合成微生物によるエネルギー生産とは、光を利用する還元力の獲得とその利用を指す。酸素発生型光合成生物には2種類の光化学反応系があり、協同して光合成反応を進めると同時に、それぞれの反応系を部分反応として利用することも可能である。しかし、光エネルギーの獲得にクロロフィル*a* (Chl *a*) を使うため、獲得できるエネルギーに限界がある。それは光化学系II (PS II) の反応中心であるP680が獲得するエネルギーで $\Delta E = 1.82 \text{ eV}$ である。Chl *a*自身は紫外線も吸収できるが、実際に光化学反応に与る最低励起一重項状態のエネルギー単位で獲得量は決まる。こうして獲得した光エネルギーをそのまま利用することのできる系があれば、このエネルギーは活かされるが、複数の反応を経る場合、エネルギー変換反応を重ねるごとにロスが生じるために効率は低下する。したがって、最初の光化学反応で獲得したエネルギーをどのような系で利用するかを吟味することは全体の変換効率を決定づける。こうした制限のある系ではあるが、今後の人類の生存には不可欠のエネルギー変換反応である。以下には実際の応用例、またアイデアだけはあがるが、可能性も含めて現状を概括する。

エネルギー生産を通じた利用法と展望（事例研究）

図1に、光合成の利用によるエネルギーやその生産物をまとめた^{4,5)}。光合成生物を含む生態系から光合成生物の持つ部品の利用のレベルまで、現在考えることのできる事項が示されている。人工光合成はやや特異な場にある。生産性が期待されながら、実際に応用されている例は限定的である。

これらのエネルギー獲得系を構築する時、微生物を細胞のまま使う場合と、その成分を抽出し、固定化などの操作を経てリアクターを作製し使う場合がある。一般的には現存する生物をそのまま利用するのではエネルギー獲得の効率が悪いために、遺伝学的または逆遺伝学的方法によりその性質を一部変更した細胞を得て使うことが考えられる。緑藻、シアノバクテリア、光合成細菌による水素発生、シアノバクテリアによる窒素固定や、現在

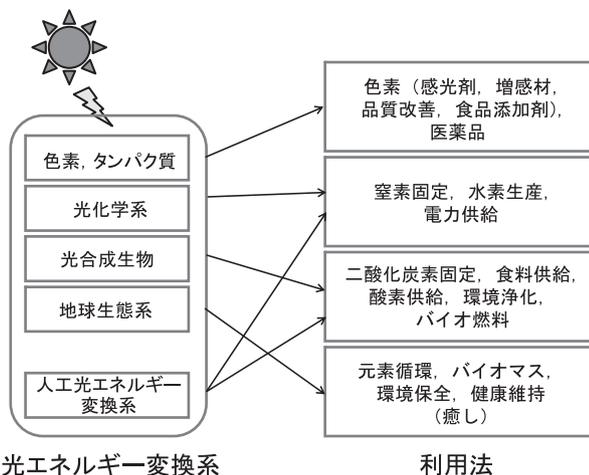


図1. 光合成生物のエネルギー変換系と利用法. 光合成生物には、部品から細胞を使ういくつかの段階の利用法がある。それぞれの段階に応じて、利用法は限定され、生産される物質(群)も変化する。人工光合成は特異な位置にあり、現在では、初期の太陽光エネルギーの電気エネルギーへの変換には寄与したが、それ以上の成果をもたらしたとは言い難い点がある。

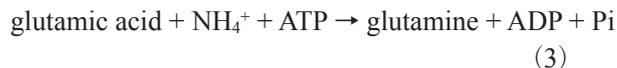
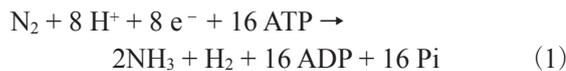
世界で注目を集めている緑藻による石油(成分)を生産するプロジェクトもこの範疇である。一方、酵素などの成分を抽出して使う系も考えられているが、反応に使うエネルギー、基質などの供給、産物の選択的な分離などを考えれば、リアクターの作製によらなければ、効率の低い系となることになる。

光合成系、もしくは光合成生物を利用することを考えると、以下のような内容が主なものとなる。この中から、トピックス的にいくつかの事例を考察する。

食品, 医薬品 我々は直接光合成生物を食品、もしくは食品添加物として摂取している。クロレラ、ドナリエラ、ユーグレナなどはその代表格である。またシアノバクテリアの1種であるスイゼンジノリ (*Aphanothese* 属) も食している。さらに食品添加物として、シアノバクテリアから抽出したクロロフィルを銅クロロフィリンとして、またフィコシアニンを青色の色素としてガムの材料に使っている。新しい応用例としては、クロロフィル派生物であるフェオフォルバイドをがんの治療薬とし

て使っている。この光線力学療法 (photo-dynamic therapy, PDT) は今後の利用法の方向性を示すと考えられる。

窒素固定および水素発生 窒素固定、水素発生は光化学系Iの還元側で生じた還元力を使ってエネルギーを獲得する反応である。窒素固定は、一部のシアノバクテリア (*Anabaena, Calothrix, Nostoc*) や光合成細菌 (*Chromatium, Rhodospirillum*) で実際に行われている。反応は、



で、(1)はフェレドキシンからの電子を使って nitrogenase が、(2)、(3)は glutamine synthetase が触媒する。実際の生態系の中では重要な反応であるが、大規模な利用という意味では、ハーバーボッシュ法に比べて、特に利用率が高いわけではない。

一方、水素発生はこれからのエネルギー獲得には不可欠の方法であるが、現時点での効率はきわめて低い⁶⁾。水素発生には、nitrogenase を使う方法と hydrogenase を使う方法があり(表1)、それぞれに長所、短所がある。したがって現在は両方のアプローチがなされている。ただ、nitrogenase を使う場合には、分子生物学的方法を組み合わせ、酵素活性に変異を導入することが不可欠とされているので、少し長期間の開発を見込むことが必要であろう。

バイオ燃料 バイオ燃料は、植物もしくはその産物を利用してエタノールを生産することであり、穀物、廃蜜糖の発酵などが技術の根幹をなす。問題点は、食料との材料確保の競合が起こり、コスト高を招くことである。将来性は技術的な面よりも、食料との競合という政策的な面に重きが置かれると考えられる。

石油代替炭化水素生産—緑藻 (*Botryococcus*) 石油代替炭化水素生産が注目されている。すでに企業ベースとして、特定の藻類にバイオディーゼルを生産させる技術が確立されており、将来性も期待されている。一般に緑藻の炭化水素生産に関わる酵素の数は限定的であ

表1. 水素発生における問題点

利用する酵素	Nitrogenase	Hydrogenase
理論的エネルギー変換効率	低い 窒素固定条件下 (3.5–4.1%) 窒素非固定条件 (14–16%)	高い 二段階生産方式で22%
酸素感受性	きわめて高い	一般にきわめて高い
酸素共存下での水素生産	可能	困難
連続水素生産	可能	困難
		酸素発生型光合成と水素生産のプロセス分離が必要 (二段階生産方式)

り、鍵となる酵素に遺伝子工学的に変異を導入することができれば、生産物を制御することが可能であることは十分に知られていた。現在の実験室レベルから、実際の生産現場への移行に問題がなければ、将来のエネルギー源として十分に考えられる。

バイオマス-非食料材料からの生産 バイオマスの利用は潜在的には大きな可能性を持っている。枯渇性資源ではない、現生物体構成物質起源の産業資源を用いて、メタン生成、セルロースの醸造によるアルコール（エタノール）生成、さらには可燃廃棄物（廃棄物固形燃料、木質ペレット）を直接作製する方法など複数の方法がある。休耕地で栽培される食料にしない米の利用も可能で、食料との競合を避ける意味でも開発の意義は大きい。光合成生物が過去において蓄積した二酸化炭素を排出するので、カーボンニュートラルと考えられる。ただし、現時点ではコスト面で採算が取れていない。厳密には材料ごとに製法が異なるが、温室効果ガスとして知られる亜酸化窒素の排出量が一般燃料の製造に比べて約2倍という報告もある。したがってこの技術は現在も発展途上というべきである。ただ、日本の研究体制として、新しい微生物の発見やその応用などは世界の研究をリードしているので、新しい再生可能エネルギー源として、研究を進めることに力を注ぐことは重要である。

特定物質生産および反応機構未同定だが有用な事例

その他、特定の物質生産や反応機構未同定ながらの有用事例の報告がある。二次代謝産物の選択的収穫や金属分子（イオン）などの特異的吸収・吸着などは前者に入り、特定の生産現場での製品の改善などにつながる事例である。レンコン栽培では、光合成細菌を用いることにより、硫化水素の減少のためか、表層の白化が起り、品質改善につながったとする報告がある。その他の事例を含めての報告例があるが、光合成細菌を使うことから、実際の結果を得るまでの因果関係が明白ではないために、原理的な議論を行うことができないという難点が現時点である。光合成細菌の代謝は複雑であり、また、他の細菌群と共存したときの代謝は特に容易には解析ができない場合が多い。こうした状況下では、現象論のできるだけ正確な記載がまずは求められる。その総合に立って解明を推し進めることになる。

環境浄化機能を通じた利用法と展望（事例研究）

光合成微生物を用いた環境浄化、保全、維持に関してもさまざまな利用法が考えられ、また実際に使用されている。この場合、主に光合成細菌が使われ、藻類が使われている事例は限定的である。光合成細菌の持つ多様な代謝経路を利用している事例が多い。金属の取り込み、硫化物処理、有機物処理などにおいて、単独の種（株）を用いる場合と、他の生物（細菌）との混合培養系などを目的に応じて使い分けている。

環境維持・改善を具体的な目指す利用法として、汚水処理や土壌汚染物質分解など多くの報告がある。全国の汚水処理施設で利用されている標準活性汚泥法については、光合成生物を含む微生物集団の連鎖的な反応によって有機物の分解が行われ、汚泥が除去されている。この他にも、求められる排水の質に応じてさまざまな微生物集団が使われ、実際の要件を満たしている。

しかし、こうした反応系を個々の反応に分けて解析し、それらをうまくまとめれば理想の処理施設が完成するわけではない、という事実がある。我々の知識は実際の反応系を解明するまでには追従していないのが現状であり、したがって現象論の記載と、それらを基礎とする現場の研究者の経験に基づく運用が最も大切である、という現実がある。光合成微生物を使った環境浄化は今後も使い続けられることは確かである。しかし、研究者は一刻も早く、記載のレベルで良いので、現実を正確に把握することを求められている。自戒を込めて、この一文を記す。

まとめ

すでに喫緊の問題となっている化石燃料に代わるエネルギー獲得方法については、いくつもの可能性のどれかひとつに賭けるという状況ではなく、可能な限り選択肢を広げ、できるところから始めるという姿勢が重要である。また地域の特色を活かした地熱などの限定的なエネルギー源の活用もある。しかし、究極のエネルギー源は太陽光であり、太陽熱ともに、使うことのできるスペクトルを広げる基礎研究の充実が望まれる。その中には、新しい生物の探索と解析が当然含まれることとなり、日本近海、湖沼、熱水塊、温泉など、地理的に多様性に富む日本の隠れた資源を開発し、利用できる長期間の研究体制が整えられることが望まれる。

この研究は、日本学術振興会科学研究費補助金「学術創成研究」(17GS0314)、文部科学省科学研究費補助金「基盤研究B」(22370017)の援助によってなされた。この場を借りて謝意を表します。

文 献

- 1) 三室 守監修：ニュートン、光合成特集号 (2008)。
- 2) 三室 守，土屋 徹：光合成微生物の機能と応用，(上原 赫編)，p.1，シーエムシー出版 (2006)。
- 3) 三室 守：有機薄膜太陽電池の最新技術，(上原 赫，吉川 暹編)，p.9，シーエムシー出版 (2005)。
- 4) 三室 守：生物物理，**48**, 88 (2008)。
- 5) 三室 守：研究をささえるモデル生物 (吉川 寛，堀 寛監修) p.238, 化学同人 (2009)。
- 6) Allakhverdiev, S. I. *et al.*: *J. Photochem. Photobiol. C, Photochem. Rev.*, **11**, 101 (2000)。
- 7) 三室 守，村上明男：月刊海洋，**38**, 399 (2006)。

三室守先生は2011年2月8日逝去されました。光合成研究について基礎分野に限らず、さまざまな分野でご活躍されました。謹んでご冥福をお祈りいたします。(浅田泰男)